

UNIVERSITY OF

中国石油大学(北京)学术专著系列

中国典型海相和陆相 页岩储层孔隙结构及含气性

姜振学 唐相路 李卓 程礼军 原园 著



科学出版社

中国石油大学(北京)学术专著系列

中国典型海相和陆相页岩储层 孔隙结构及含气性

姜振学 唐相路 李 卓 程礼军 原 园 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对我国四川盆地、鄂尔多斯盆地和柴达木盆地等典型的页岩气盆地,开展页岩储层孔隙结构和含气性研究。在孔隙结构方面,创新性地提出基于流体注入的页岩孔隙全孔径表征技术,建立基于图像识别的消除非均质性影响的不同组分的页岩孔隙分布定量表征方法,明确页岩不同基质孔隙的定量特征,并对比海相页岩和陆相页岩孔隙结构的差异。在含气性方面,明确页岩气原位赋存状态、解吸特征及其影响因素,查明页岩吸附气、游离气和溶解气的赋存特征及其主控因素,并对比海相和陆相页岩含气性的差异。本书在页岩孔隙结构和含气性方面揭示许多新现象、新内容,并提出许多新认识、新见解。

本书可供从事页岩气勘探的地质科技工作者和非常规油气方向的相关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国典型海相和陆相页岩储层孔隙结构及含气性/姜振学等著. —北京:科学出版社, 2018

(中国石油大学(北京)学术专著系列)

ISBN 978-7-03-057663-7

I. ①中… II. ①姜… III. ①海相-页岩-孔隙储集层-研究-中国
②陆相-页岩-孔隙储集层-研究-中国 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 118565 号

责任编辑:吴凡洁 冯晓利/责任校对:彭涛

责任印制:师艳茹/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张:25

字数:488 000

定价:298.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书序

大学是以追求和传播真理为目的，并为社会文明进步和人类素质提高产生重要影响力和推动力的教育机构和学术组织。1953年，为适应国民经济和石油工业发展需求，北京石油学院在清华大学石油系并吸收北京大学、天津大学等院校力量的基础上创立，成为新中国第一所石油高等院校。1960年成为全国重点大学。历经1969年迁校山东改称华东石油学院，1981年又在北京办学，数次搬迁，几易其名。在半个多世纪的历史征程中，几代石大人秉承追求真理、实事求是的科学精神，在曲折中奋进，在奋进中实现了一次次跨越。目前，学校已成为石油特色鲜明，以工为主，多学科协调发展的“211工程”建设的全国重点大学。2006年12月，学校进入“国家优势学科创新平台”高校行列。

学校在发展历程中，有着深厚的学术记忆。学术记忆是一种历史的责任，也是人类科学技术发展的坐标。许多专家学者把智慧的涓涓细流，汇聚到人类学术发展的历史长河之中。据学校的史料记载：1953年建校之初，在专业课中有90%的课程采用苏联等国的教材和学术研究成果。广大教师不断消化吸收国外先进技术，并深入石油厂矿进行学术探索。到1956年，编辑整理出学术研究成果和教学用书65种。1956年4月，北京石油学院第一次科学报告会成功召开，活跃了全院的学术气氛。1957~1966年，由于受到全国形势的影响，学校的学术研究在曲折中前进。然而许多教师继续深入石油生产第一线，进行技术革新和科学研究。到1964年，学院的科研物质条件逐渐改善，学术研究成果以及译著得到出版。党的十一届三中全会之后，科学研究被提到应有的中心位置，学术交流活动也日趋活跃，同时社会科学研究成果也在逐年增多。1986年起，学校设立科研基金，学术探索的氛围更加浓厚。学校始终以国家战略需求为使命，进入“十一五”之后，学校科学研究继续走“产学研相结合”的道路，尤其重视基础和应用基础研究。

“十五”以来学校的科研实力和学术水平明显提高，成为石油与石化工业的应用

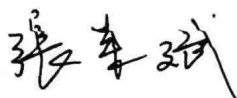
基础理论研究和超前储备技术研究，以及科技信息和学术交流的主要基地。

在追溯学校学术记忆的过程中，我们感受到了石大学者的学术风采。石大学者不但传道授业解惑，而且以人类进步和民族复兴为己任，做经世济时、关乎国家发展的大学问，写心存天下、裨益民生的大文章。在半个多世纪的发展历程中，石大学者历经磨难、不言放弃，发扬了石油人“实事求是、艰苦奋斗”的优良作风，创造了不凡的学术成就。

学术事业的发展犹如长江大河，前浪后浪，滔滔不绝，又如薪火传承，代代相继，火焰愈盛。后人做学问，总要了解前人已经做过的工作，继承前人的成就和经验，在此基础上继续前进。为了更好地反映学校科研与学术水平，凸显石油科技特色，弘扬科学精神，积淀学术财富，学校从2007年开始，建立“中国石油大学（北京）学术专著出版基金”，专款资助教师以科学研究成果为基础的优秀学术专著的出版，形成《中国石油大学（北京）学术专著系列》。受学校资助出版的每一部专著，均经过初审评议、校外同行评议、校学术委员会评审等程序，确保所出版专著的学术水平和学术价值。学术专著的出版覆盖学校所有的研究领域。可以说，学术专著的出版为科学研究的先行者提供了积淀、总结科学发现的平台，也为科学研究的后来者提供了传承科学成果和学术思想的重要文字载体。

石大一代代优秀的专家学者，在人类学术事业发展尤其是石油石化科学技术的发展中确立了一个个坐标，并且在不断产生着引领学术前沿的新军，他们形成了一道道亮丽的风景线。“莫道桑榆晚，为霞尚满天”。我们期待着更多优秀的学术著作，在园丁灯下伏案或电脑键盘的敲击声中诞生，展现在我们眼前的一定是石大寥廓遥远、星光灿烂的学术天地。

祝愿这套专著系列伴随新世纪的脚步，不断迈向新的高度！



中国石油大学（北京）校长

2008年3月31日

序

石油与天然气是保障国家社会经济安全的重要战略资源。随着经济的高速发展,我国对能源(特别是油气资源)的需求日益增长。2016年,我国原油的对外依存度高达 65.5%,天然气对外依存度上升至 36.6%,严重影响国家能源安全与经济发展。我国非常规油气资源为常规油气的 1.5~2 倍,资源丰富,潜力巨大。2016年,我国页岩气钻井累计 1000 余口,年产量超过 $78 \times 10^8 \text{m}^3$,其中仅焦石坝页岩气田的探明储量已超过 $6000 \times 10^8 \text{m}^3$,呈现巨大的勘探前景。

页岩气赋存于页岩孔隙中,研究页岩孔隙结构特征及其含气性是深入认识页岩气富集机理的关键,对页岩气勘探与开发具有重要指导意义,也是对我国非常规油气地质理论体系的丰富和发展,其中页岩气储层表征与含气性检测是落实页岩气储量规模的关键性技术,也是实现页岩气资源开发利用的前提条件。近年来,因油气而引发的国际纠纷和安全问题并不鲜见,而且呈日益严重的趋势。现代页岩气储层表征与含气性检测技术的创新发展与推广应用,可望提高页岩气勘探的成功率,使非常规油气资源高效开发利用成为现实,以弥补我国能源发展后续资源不足,降低我国天然气的对外依存度,保证国家的能源安全,对我国经济的可持续发展、社会的稳定起至关重要的作用。从长远来看,巨大的页岩气资源正在改变世界油气供应格局。

姜振学教授等在科研实践的基础上,撰写的《中国典型海相和陆相页岩储层孔隙结构及含气性》一书,抓住页岩气勘探和开发的两个关键问题:孔隙结构与含气性。前者是页岩气富集的关键,后者是页岩气能否开发的基础。书中着重阐述页岩纳米级孔隙结构特征,明显不同于常规油气储层的微米级孔隙的研究尺度、研究方法和技术手段,书中采用当前的先进技术,达到从定性到定量多尺度的全孔径表征。此外,关于页岩储层含气性,该书结合野外现场评价和实验室评价技术,达成对页岩含气性的全面评价,而且在掌控典型盆地地质背景和储层基本特

征的基础上，研究典型地区的页岩储层孔隙结构特征，进而评价其含气性，具有层层递进的关系，并对其研究现状、实验基本原理、应用等方面进行了翔实的阐述，可读性较强。该书的出版，将为我国丰富的石油地质理论宝库添加新的篇章，并为页岩气勘探提供有力的指导和有益的借鉴。



中国科学院院士

2018年1月5日

前言

近年来,页岩气作为重要的非常规油气资源受到国内外的广泛重视,成为全球油气勘探的热点。天然气的广泛应用正在改变着能源消费结构,而页岩气正在成为油气勘探接替的重要领域。世界页岩气资源量丰富,与常规天然气资源量相当,其中美国、中国、加拿大、阿根廷、墨西哥等国家的页岩气资源尤为丰富。目前,实现页岩气商业开发的国家主要有美国、加拿大和中国。

自 1821 年页岩气在美国 Fredonia 的浅层低压裂缝地层中首次开采以来,其作为一种非常规气藏类型在美国受到日益广泛的重视。20 世纪 30 年代,水平井技术得以实现,首口压裂井于 1947 年出现在美国。随后的几十年中,随着水力压裂技术的成熟,页岩气勘探开发在美国实现了巨大的成功。21 世纪以来,伴随页岩气产量“井喷式”增长,在美国首先掀起“页岩气革命”。在页岩气的促进下,2015 年美国成为全球最大的产油气国,天然气总产量达 $9315 \times 10^8 \text{m}^3$,创历史新高,其中页岩气产量占天然气总产量 47%。页岩气藏资源量巨大,目前已在北美天然气产量和储量中占据最重要的地位。

中国页岩气勘探起步较晚,处于勘探和初步开采阶段。“十二五”期间初步设立了长宁-威远、昭通、涪陵、延安等国家级页岩气示范区。我国许多盆地具有良好的页岩气发育潜力,目前已在四川盆地和鄂尔多斯盆地实现商业开采,并在柴达木盆地、准噶尔盆地、济阳拗陷、中下扬子等地区找到了页岩气藏发育的大量证据。在页岩气开发利用补贴政策和民间开发政策的刺激下,中国页岩气行业发展迅速。目前,中国页岩气累计探明储量超过 $9000 \times 10^8 \text{m}^3$,2017 年年产量超 $90 \times 10^8 \text{m}^3$,显示出巨大的勘探开发前景。

此外,我国清洁能源匮乏,油气生产不能满足国民经济发展的需要,供需矛盾较大。页岩气的开发利用,十分有利于环境保护与可持续发展。理论和技术的不断发展为我国页岩气的勘探实践带来了新的契机,页岩气勘探预测研究对迎来

我国天然气新的储量增长高峰具有积极意义。

作者的页岩气研究工作开始于 2011 年，先后完成了一系列相关的研究任务。于 2011 年之后陆续得到了国家自然科学基金“页岩非均质性和微-纳米孔喉结构对含气性的控制机理(41472112)”和“全球下志留统富含有机质页岩成因及优质储层分布规律研究(41728004)”、国土资源部“西北区页岩气资源调查评价与选区(2009GYXQ15-09-05)”和“典型富有机质页岩储集能力及其控制因素研究(12120114046701)”、重庆地质矿产研究院“页岩气勘探开发关键技术集成及低成本开发战略规划(CQGT-KJ-2012-5)”、陕西延长石油(集团)有限责任公司(以下简称延长石油)“延长石油陆相页岩储层评价与产能预测”等资助，并在国家“十三五”重大专项“中生界陆相不同盆地类型页岩气赋存方式与富集规律研究(2016ZX05034-001)”和“五峰组—龙马溪组富有机质页岩储层精细描述与页岩气成藏机理(2017ZX05035-002)”及中国石油大学(北京)拔尖人才科研启动基金“页岩气散失过程及散失量评价(2462017YJRC024)”的支持下，研究工作进一步系统化，研究深度逐渐加大，最终在中国石油大学(北京)学术专著出版基金的支持下得以出版。从 2011 年开始，作者针对页岩气储层特征先后开展了探讨性实验研究，其中包括页岩储层有机地球化学特征、页岩储层岩石学特征、页岩储层孔隙结构特征、页岩储层物性特征和页岩储层含气性特征等研究。为了进一步确认实验结果的可重复性和实验分析的可靠性，作者又不断对部分实验进行了验证分析，目前进一步的实验研究仍在进行中，这些工作都是与油田研究院及相关部门的专家合作共同完成的。

在资料分析和实验研究基础上，2013 年开始逐渐形成我国典型海相和陆相页岩储层孔隙结构和含气性的系统认识；2015 年构建了本书框架；2016 年在国家科技重大专项、国家自然科学基金和美国犹他大学合作交流项目资助下，同时吸纳了国内外相关研究成果，理论认识和研究方法进一步成熟。通过进一步的实验分析和理论研究，本书书稿定型(书中所列参考文献截至 2018 年年初)，它是长期“产、学、研”结合的产物，书中部分成果认识已经或正在得到不同程度的认可和验证。

书中以历年的研究成果为基础，以国家自然科学基金和国家科技重大专项资助项目研究成果为主线，对我国典型海相和陆相页岩储层孔隙结构和含气性的相关实验分析、理论研究、应用实践等方面成果做了总结和分析。以《中国典型海相和陆相页岩储层孔隙结构及含气性》奉献读者，以期通过对现有资料和认识的

归纳总结为今后相关研究提供一些借鉴,尤其期望以这样抛砖引玉的方式对页岩储层地质理论和我国页岩气勘探预测研究做出力所能及的贡献。书中所用资料、基本观点和认识结论均截至2018年年初。页岩储层孔隙结构和含气性研究尚有许多争议问题有待进一步探究,一些观点认识也将不断得到修正和充实,这还有待今后工作的进一步努力。

本书在内容上共分六章:第一章以我国页岩气勘探开发历程、开发现状为基础,讨论了我国页岩气开发趋势;第二章以四川盆地古生界牛蹄塘组和五峰组—龙马溪组页岩为例,讨论了我国典型海相页岩储层的基本特征;第三章以鄂尔多斯盆地中生界延长组页岩、柴达木盆地中生界大煤沟组和新生界第四系页岩为例,探讨了我国典型陆相页岩储层的基本特征;第四章系统总结了页岩储层孔隙结构表征的技术方法,探讨了典型海相和陆相页岩储层孔隙结构的特征及其控制因素;第五章系统总结了页岩储层含气性评价方法和研究现状,探讨了典型海相和陆相页岩储层含气性特征及其控制因素;第六章总结了本书的基本结论和认识。

多年来,先后参加上述科研工作并做出实质性技术贡献的有数十人,本书所列作者只是他们中的持续研究者和各个研究阶段的代表性人物。参加研究工作的主要人员有姜振学、唐相路、李卓、程礼军、原园等。全书由姜振学主持撰写,包括提出编写提纲、各章节内容安排调整及最后统一修改定稿,唐相路、李卓、程礼军、原园等参加了全书统编工作。

在此,首先感谢对相关研究做出贡献的所有同仁。郝进、邢金艳、赵若彤、罗泉、黄何鑫、姚立鹏、刘国恒、陈斐然、周洵、郭州平等直接参与或指导了野外、现场解吸实验等研究工作。课题组教师所带博士、硕士研究生先后参加了该项研究工作,其中许多研究生也提供了有益的帮助,如周雯、李鹏、毕赫、许野、李卫兵、杨佩佩、杨潇、熊凤阳、阴丽诗、谢雪恋、刘天琳、常佳琦、黄一舟、薛子鑫、文铭、仇恒远、王幸蒙、魏凯、谌志远、王国臻、熊添、黄璞、王朋飞、姜涛等。

本书的撰写得到了中国石油大学(北京)钟宁宁教授、黄志龙教授、陈践发教授、刘洛夫教授、蒋恕教授等的支持和指导,得到了重庆地质矿产研究院张烨高级工程师、曾春林工程师、蒙春、徐文华、陶洪华、李红英、张莺莺等的支持与帮助,得到了延长石油王香增总地质师、尹锦涛工程师,青海油田研究院的张永庶主任、申玉山工程师及国土资源部油气资源调查中心的包书景高级工程师、郭天旭工程师、周志工程师等现场专家的大力支持和帮助。衷心感谢国家自然科学基金

基金、国家科技重大专项、国土资源部、重庆地质矿产研究院、延长石油、青海油田等对课题组页岩储层研究的一贯支持和长期帮助。

我国页岩气研究正稳步有序推进，但仍然存在许多争议。希望能通过本书与相关同行专家进行交流，以进一步发展、完善我国页岩气地质理论、方法和技术。同时由于时间仓促，水平有限，文中错误在所难免，恳请读者批评指正。

姜振学

2018年1月

目录

丛书序

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 中国页岩气勘探开发历程	1
第二节 中国页岩气勘探开发现状	6
第三节 中国页岩气发展趋势	9
第二章 典型海相页岩储层特征——以四川盆地为例	16
第一节 四川盆地区域地质概况	17
第二节 下古生界牛蹄塘组页岩储层特征	21
第三节 下古生界五峰组—龙马溪组页岩储层特征	37
第三章 典型陆相页岩储层特征——以鄂尔多斯盆地和柴达木盆地为例	54
第一节 区域地质概况	54
第二节 中生界延长组页岩储层特征	78
第三节 中生界大煤沟组页岩储层特征	87
第四节 新生界干柴沟组页岩储层特征	91
第五节 新生界第四系页岩储层特征	98
第四章 中国典型海相和陆相页岩储层孔隙结构及控制因素	105
第一节 页岩储层孔隙结构表征技术方法	105
第二节 页岩储层孔隙形貌特征	116
第三节 页岩储层孔隙定量特征	143
第四节 页岩储层孔隙演化特征	192
第五节 页岩储层孔隙结构控制因素	204

第五章 中国典型海相和陆相页岩储层含气性及控制因素..... 241

 第一节 页岩储层含气性评价方法及研究进展..... 241

 第二节 页岩储层原位含气量特征..... 268

 第三节 页岩气赋存状态特征..... 277

 第四节 页岩储层含气性控制因素..... 295

第六章 结论与认识..... 361

 第一节 页岩储层孔隙结构特征及主控因素..... 361

 第二节 页岩储层含气性特征及主控因素..... 363

参考文献..... 367

第一章

绪 论

第一节 中国页岩气勘探开发历程

页岩气的勘探开发始于 19 世纪的美国, 1821 年, Hart 等在美国东部阿巴拉契亚盆地的泥盆系页岩中钻探了世界上第一口页岩气井(Curtis, 2002)。20 世纪 20 年代美国页岩气开始进入工厂化生产, 70 年代美国中、西部也相继开始进行页岩气的勘探开发工作, 90 年代美国已经成功对页岩气进行了大规模商业开发(Tian et al., 2014)。伴随技术的进步, 特别是从 2006 年开始, 美国页岩气产量开始迅猛增长(Wang et al., 2014)。2005 年美国页岩气产量为 $204 \times 10^8 \text{m}^3$, 在全年天然气总产量中只占 4%; 2010 年页岩气产量增长至 $1378 \times 10^8 \text{m}^3$, 占天然气总量的 23%; 2015 年美国页岩气产量 $4250 \times 10^8 \text{m}^3$, 在全国天然气总产量中占比 47%, 呈快速增长态势(贾承造等, 2016)。

中国页岩气资源的勘探开发与美国相比开展较晚。自 20 世纪 60 年代以来, 我国对页岩气的认识停留在泥岩裂缝性油气藏, 并相继在一些含油气盆地的泥页岩中发现明显的油气显示, 部分还获得了工业油气流, 初步展现了泥页岩储层的资源潜力(李新景等, 2007)。虽然我国在泥页岩中发现了不同规模的油气藏, 但由于对页岩气理论认识上的局限性及对泥页岩储层勘探开发的忽视性, 导致我国对泥页岩的油气勘探长期没有出现较大的突破, 一直停留在规模较小的裂缝性油

气藏阶段，也没有形成有关页岩气配套的勘探、开发技术、研究方法和理论知识，页岩气的勘探开发和研究明显滞后(张金川等，2009)。

北美地区页岩气的快速发展，无疑在全世界范围内掀起了一场“页岩气革命”。我国自进入 21 世纪以来开始关注页岩气，主要经历了以下四个阶段的发展历程。

一、跟踪调研阶段

进入 21 世纪以来，我国页岩气研究开始进入跟踪调研阶段，该阶段主要进行了一些前期的探索和准备工作。首先跟踪调研了美国页岩气的发展动态，在此基础上进行了页岩气的相关研究。期间，国内各大石油企业、大专院校及科研机构通过查阅、收集了大量美国页岩气勘探开发的文献资料，开展了我国页岩气资源评价及成藏地质条件的相关研究，对促进我国页岩气的勘探开发起到了积极的推动作用(郭旭升，2014a)。

二、资源评价阶段

随着我国天然气对外依存度的不断提高，能源安全问题变得更加严峻，加速提升天然气在一次能源中所占比例，改善能源结构和保障能源安全迫在眉睫，因此海相丰富的页岩气资源的勘探开发越发被重视。2005 年开始，中国石油天然气集团公司(以下简称中石油)、中国石油化工集团公司(以下简称中石化)、国土资源部及部分高校等相关单位参考北美页岩气勘探开发的经验，以区域地质调查为基础，利用老井复查等方法，调查了我国页岩气形成与富集成藏的地质条件，评价了我国页岩气资源潜力，探索了我国页岩气的发展前景，具体情况具体分析，逐渐形成了一套适合中国海相页岩气的理论体系和勘探方法(王志刚，2015)。

2006 年，中石油与美国的新田石油公司对我国展开了第一次页岩气研讨，在此次研讨过程中，根据川南威远、阳高寺等地区常规天然气钻井过程中钻遇寒武系筇竹寺组和志留系龙马溪组时出现的丰富含气显示现象，首次提出中国南方海相沉积盆地具有海相页岩气形成与富集的基本地质条件，并认为我国南方海相页岩发育区是我国页岩气勘探开发的有利地区及首选地区，甚至可成为我国油气资源的重要战略接替区域(郭彤楼和张汉荣，2014)。除此之外，一些陆相沉积盆地如松辽盆地、鄂尔多斯盆地、吐哈盆地、准噶尔盆地等同样具有页岩气富集成藏的地质基础和条件(董大忠等，2016)。

在该阶段，国土资源部油气资源战略研究中心联合国内几家石油公司及石油

院校开展了我国页岩气勘探开发的一些前期调研工作和相关技术准备,开展初步的页岩气资源潜力研究和选区评价工作。国土资源部通过“全国页岩气资源潜力调查评价与有利区优选”的研究工作,对我国陆域页岩气资源潜力进行系统评价,评价范围包括上扬子及滇黔桂地区、华北及东北地区、中下扬子及东南地区、西北地区四大区(不含青藏区),共优选出有利区 180 个,累计面积 $1.11 \times 10^6 \text{km}^2$,页岩气可采资源潜力评价结果为 $25.08 \times 10^{12} \text{m}^3$ (胡文瑞和鲍敬伟,2013)。在此期间,国家高度重视页岩气资源的勘探开发,2011 年国土资源部将页岩气正式列为我国的第 172 种矿产,对其按独立矿种进行管理。2012 年国家发展和改革委员会(以下简称国家发改委)、国家财政部、国土资源部、国家能源局研究制定了《页岩气发展规划(2011~2015 年)》,提出 2015 年实现页岩气产量 $65 \times 10^8 \text{m}^3$,并将页岩气开发向民营资本开放,加快了页岩气勘探、开发及利用的步伐(胡庆明,2014);同年 11 月,国家发布页岩气开发利用财政补贴政策,进一步鼓励产业发展。在页岩气选区评价的基础上,国内多家企业在我国南方开展了页岩气井钻探评价工作,部分井有页岩油气发现,但是并没有进入商业开发阶段。

三、先导试验阶段

2007 年以来,中石油、中石化及中国海洋石油集团有限公司(以下简称中海油)积极采取多种途径与国外油气企业在页岩气勘探开发方面展开合作,并建立了多个页岩气开发先导试验区。2007 年,中石油与新田石油合作,开展中国与国外的首个页岩气联合研究项目(威远地区寒武系筇竹寺组页岩气资源潜力评价与开发可行性研究)(董大忠等,2012)。2008 年 11 月 26 日,中石油勘探开发研究院在四川盆地南部长宁构造志留系龙马溪组露头区钻探了 CX-1 井,该井是我国第一口页岩气地质评价浅井,设计井深为 200m,全井段取心,共取心 154m,采集各种地化样品及岩矿样品 200 余个,页岩气吸附样品 14 个,GR 值测定 780 个,对页岩吸附气含量等多项数据进行了全面分析(钱伯章和朱建芳,2010)。

2009 年,国土资源部在全国油气资源战略选区调查与评价专项中设立了“全国重点地区页岩气资源潜力评价和有利区带优选”重大专项;中石油与壳牌(Shell)公司在四川盆地富顺-永川地区开展了我国第一个页岩气国际合作勘探开发项目,率先在四川盆地长宁-威远、云南昭通等地区建立中国页岩气工业生产先导试验区,中石油与壳牌公司联合对研究区志留系、寒武系页岩气的勘探开发潜力进行评价研究,先导试验区面积达 3818km^2 ,吹响了我国页岩气勘探开发的号

角,标志着我国首个页岩气国际合作开发项目正式进入实施阶段(王京光等,2013)。为了探索四川盆地东部页岩广泛出露区和高陡构造复杂区的页岩气勘探前景,国土资源部在重庆市彭水县境内钻探了地质调查井 YY-1 井(张金川等,2010)。与此同时,我国设立首个页岩气矿权,更加推动了页岩气勘探开发的步伐(张大伟,2011)。

2010 年以来,中国政府高度重视页岩气产业的发展,成立了国家能源页岩气研发(实验)中心,设立专项项目研究,国际合作继续深入,相关制度持续完善。2010 年,中美两国制订并签署了《美国国务院和中国国家能源局关于中美页岩气资源工作行动计划》(邹才能等,2011a);中石油与美国康菲国际石油有限公司、挪威国家石油公司合作开展四川盆地南部地区页岩气评价和勘探;中石化与英国石油公司(British Petroleum, BP)在贵州凯里等地合作开采页岩气,同时建立中国首个海相页岩地层数字化标准剖面(贾承造等,2012);中石油在四川威远通过对 W-201 井大型水力压裂发现威远页岩气田。自 W-201 井在上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组海相页岩中获得工业气流后,我国以南方下古生界五峰组—龙马溪组、筇竹寺组(及相当层位)海相页岩为重点,并借鉴北美页岩气勘探开发的成功经验,开展页岩气地质综合评价、勘探评价及开发先导实验,陆续在中国南方地区五峰组—龙马溪组发现页岩气,并在四川盆地威远、长宁、昭通、富顺—永川、涪陵等地区获得工业页岩气产量(董大忠等,2016)。

2011 年,国家科学技术部(以下简称科技部)设立了“页岩气勘探开发关键技术”重大专项;中石油、中石化、延长石油、国土资源部陆续发现长宁、富顺—永川海相页岩气田、甘泉—下寺湾陆相页岩含气区;页岩气被批准成为我国第 172 种独立矿种,第一轮页岩气矿权出让(李响,2012)。2012 年,中石化将页岩气勘探重点向四川盆地及其近缘转移,确定四川盆地东南缘下志留统是页岩气勘探突破有利首选区域,同时部署钻探 JY-1 井,成功发现了我国首个大型页岩气田——涪陵气田(王志刚,2015)。我国《页岩气发展规划(2011~2015 年)》发布,国家首次公开发布中国页岩气资源量,第二轮页岩气矿权出让(金庆花等,2013)。

2013 年,中石化涪陵气田取得重大突破,1 月 8 日 JY-1HF 井生产的天然气开始充装至 CNG 车储气罐外运,标志着我国海相页岩气先导实验阶段取得重大突破,我国页岩气商业开发已经开始起步。JY-1HF 井自 2012 年 12 月 4 日开采以来,产量一直稳定在 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,是我国在页岩气领域实现实质性突破的第一口井。重庆市政府将其命名为“页岩气开发功勋井”。同年国家能源局制定了《页